

전구강수관측 (GPM) 활용을 위한 제언

손병주^{1,*} · 남재철² · 박선기³ · 안명환² · 유정문³ · 이희상¹ · 장동연² · 허창희¹ · 배덕효⁴
김성준⁵ · 오현중¹ · 박성찬¹ · 김주홍¹

¹서울대학교, ²기상연구소, ³이화여자대학교

⁴세종대학교, ⁵건국대학교

(2005년 2월 11일 접수; 2005년 3월 7일 승인)

Proposing Research and Development Activities for Utilizing the Global Precipitation Measurement (GPM)

Byung-Ju Sohn^{1,*}, Jae-Cheol Nam², Seon-Ki Park³, Myung-Hwan Ahn², Jung-Moon Yoo³,
Hee-Sang Lee¹, Dong-Eon Chang², Chang-Hoi Ho¹, Deg-Hyo Bae⁴, Seong-Jun Kim⁵,
Hyun-Jong Oh¹, Seong-Chan Park¹ and Ju-Hong Kim¹

¹Seoul National University, ²METRI/KMA, ³Ewha Womans University,

⁴Sejong University, ⁵Konkuk University

(Manuscript received 11 February 2005; in final form 7 March 2005)

Abstract

Extending the success of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), the spaceborne measurement of precipitation by Global Precipitation Measurement (GPM) is initiated. The GPM consists of a core satellite which will have a dual-frequency precipitation radar (DPR) and a constellation of small satellites equipped with microwave radiometers. The GPM is inherently a global program. Responding to the GPM plan, many other nations are much interested in participating in the GPM team or simply utilizing GPM products aiming at the development of meteorological technology. Korea can fully function its role if Korea is selected as a CAL/VAL site for the GPM because Korea maintains a well-established dense rain gauge network (AWS), precipitation radars, and the Haenam super site for surface observation. In this feasibility study, the necessities of the GPM project in the context of academical and social backgrounds and associated international and domestic activities are investigated. And GPM-related core technologies and application areas are defined. As a result, it is found that GPM will represent a great opportunity for us because of its ability to provide not only much enhanced three-hourly global rain products but also very useful tools for the enhancement of weather forecasting capabilities, management of water resources, development and implementation of monitoring techniques for severe weather phenomena, agricultural managements and climate application. Furthermore, rain retrieval and CAL/VAL technologies obtained during the involvement in the international GPM project will serve as basic knowledges to run our own geostationary satellite program.

Key words: Rainfall, GPM, Satellite, Microwave

1. 서론

최근 들어 전 세계적으로 태풍이나 집중호우 등의

악기상은 물론 지구환경변화에 따른 가뭄, 홍수, 혹서, 혹한 등 기상이변에 의한 재해가 증가하고 있으며 그 인적, 재산적 피해 규모도 점점 커지고 있는 추세이다. 한반도도 그 예외가 아니다. 우리나라는 1993-2002의 10년 간 기상재해로 인해 연평균 129명의 인명 피해와 약 8천 억 원의 막대한 재해 피해를 겪었다 (소방방재청, 2004). 특히 2002년 8월말 태풍 루사에 의해 246명이 사망, 실종하고 재산 피해 5조 1천 억 원 이상, 피해

*Corresponding Author: Byung-Ju Sohn, Department of Atmospheric Sciences, Seoul National University, Seoul, 151-747 Korea
Phone : +82-2-880-7783, Fax : +82-2-883-4972
E-mail: sohn@snu.ac.kr

복구비용 7조원 이상이라는 엄청난 피해를 입었으며, 2003년 9월에는 태풍 매미에 의해 130명이 사망, 실종하고 약 5조원의 재산 피해를 입는 등 기상 재해는 이제 국가 경쟁력에까지 영향을 미치는 결과를 초래하고 있다. 따라서 수문학적 순환을 이해하고 아울러 예보력을 증대시키기 위해서는 시공간적으로 균일하고 광범한 지역을 관측하여 실시간의 분석을 가능케 하는 인공위성의 발사와 활용이 절실히 요구된다. 특히 강수량의 관측과 이의 기상예보에의 활용은 대기과학의 첨단 연구 분야 중의 하나이며, 기상자원 활용의 극대화를 위해서 시급히 극복해야 할 과제이다.

역사적으로 강수량의 측정은 측우기처럼 강우계를 이용한 육상에서 가능했다. 해양관측은 위성관측이 시작됨에 따라 비록 정성적이지만 분포와 강도 등의 측정이 이루어졌다. 이후 1987년 다중 채널의 수동 마이크로파 복사계인 Special Sensor Microwave Imager (SSM/I)를 탑재한 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 위성의 발사 후에 해양 지역에 대한 비교적 정확한 강수량 추정이 가능하게 되었다. 이에 따라 위성 자료를 이용한 강수량 추정의 중요성이 부각되어 1990년대에 미국 NASA는 Mission to Planet Earth Program에 따라 우주공간으로부터 강수량을 측정하는 새로운 연구를 시작했다. 1997년 미국 NASA와 일본 National Space Development Agency (NASDA) 사이의 공동 프로그램인 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)은 열대지역과 아열대지역의 강수를 측정하기 위한 임무를 시작하였다.

TRMM의 성공적은 임무수행은 강수와 관련한 수문학적 지식을 획기적으로 제공하게 하였고 강수량의 예보에의 활용기법의 응용 등 대기과학 분야에 많은 공헌을 하였다. 이러한 성공에 힘입어 대기과학자들은 TRMM이 지녔던 지역적인 한계를 극복하고 전구의 강수관측과, 수평, 수직 성분을 포함한 구름의 구조와 미시적 물리 현상에 대한 더 나은 이해를 통해 강수 과정에 대한 더 많은 과학적 지식을 얻고자하는 노력이 지속되고 있다. 또한 단기간 강수량 자료 축적에의 불확실성을 감소시킬 수 있는 충분한 표본 관측 자료를 구축하기를 노력하며 이러한 과학적 지식의 이점들을 사회 발전을 위해 여러 분야에 활용하고자 노력하고 있다. 현재 앞서 언급한 과학적 사회적 관심사들을 수행하기 위해 NASA를 중심으로 세계 여러 나라의 국제 협력 프로그램인 Global Precipitation Measurement (GPM) 사업을 추진 중이다 (기상청, 2004). TRMM의

연장선상에 있는 GPM 사업이 성공적으로 이루어질 경우 원격 탐사 분야의 위성 정보 기술 향상이라는 일차적 성과뿐만 아니라 수문/수자원, 농업, 산림, 공공사업, 군사 관련 업무 등과 같은 다양한 영역에서 기술 개선 및 개발과 실질적 업무 능력 향상 등의 효과가 기대된다.

특히, GPM 자료는 광범위한 영역에 대해 거의 연속적인 강수 관측 자료를 제공할 수 있기 때문에 태풍, 집중호우, 홍수 등의 악기상 현상 감시 및 예보와 기상재해의 경감에 공헌할 뿐 아니라 한반도 기상/기후 변화와 연관된 수자원을 포함한 대기감시에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 그리고 앞에서 언급한 바와 같이 물순환 시스템의 이해를 증진시키고 단기 또는 장기 예측 정확도를 상당히 향상시킬 수 있을 것으로 예상하고 있으며, 나아가 수자원 관리 기술과 농경을 포함한 수자원 확보와 경영에 기여함으로써 국가 경쟁력 향상에 이바지하리라 예상된다. 따라서 GPM에 관심과 흥미를 가지고 적극 참여함은 국가경쟁력 향상을 위한 당연한 수순이라 생각한다. 그러나 개인 또는 기관의 개별적 참여가 아닌, 투자한 재정과 시간에 비해 수확의 극대화를 유발할 수 있는 계획적인 참여와 GPM 활용의 극대화를 위한 준비와 성찰이 요구된다. 이러한 국내외적 동향과 필요에 부응하여 이 논문에서는 현재 진행되고 있는 전구강수관측 프로그램을 소개하고, 우리의 적극적인 참여를 강조하였으며, 대기과학, 수문, 농업분야의 GPM 관련 핵심기술을 정의하고, 참여 이익의 극대화를 위한 방안을 제안하였다.

2. 전구강수관측 (GPM) 프로그램

GPM은 TRMM 위성과 유사한 한 개의 핵심 (Core) 위성과 마이크로파 복사계를 탑재한 10여개의 보조 (Constellation) 위성으로 구성되며 매 3시간 간격의 전구 강수량 생산하는데 목적이 있다 (Fig. 1). 특징적인 것을 간단히 기술하면 GPM 핵심위성은 2007년 11월 발사할 예정이며 GPM 마이크로파 복사계와 Ku, Ka 밴드를 갖는 강수레이더를 탑재하여 강수량을 관측함은 물론 다른 보조 위성에서 관측한 강수량을 보정하는 역할을 담당하게 될 예정이다. 특히, 핵심 위성에 탑재된 강수레이더는 Ku, Ka 밴드의 두 채널을 갖게 되어 dual-frequency precipitation radar (DPR)로 불린다. 두개의 채널에서 관측한 감쇄 정보를 이용하는 DPR은 한 개의 채널을 가지고 있는 TRMM/PR에

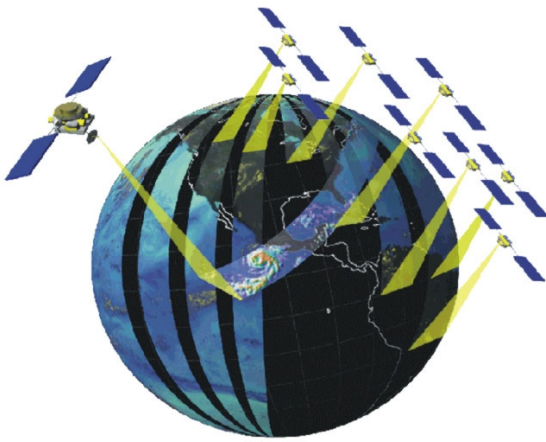


Fig. 1. Schematic picture showing GPM core and constellation satellites. Adapted from Smith and co-authors (2004).

비교하여 보다 정확한 강수분포와 수문정보를 공급하리라 예상하고 있다. 또한 TRMM의 관측영역에 포함되지 않았던 중위도 및 고위도가 GPM 관측영역으로 설정됨에 따라 다중채널 레이더 관측은 고위도 강수 특히 강설에 대한 획기적인 정보를 공급하리라 예상된다. DPR의 채널은 13.6 GHz (PR-U)와 35.56 GHz (PR-A)이며 이 중 13.6 GHz 채널은 TRMM/PR의 13.8 GHz와 유사하다. 계획하고 있는 GPM 탑재센서, 공간 및 시간 해상도 등 GPM 관련 기술적인 구체정보는 NASA에서 작성한 GPM-Report 8 (Adams *et al.* 2002)에서 찾을 수 있다.

GPM은 위성 자료를 이용한 차세대 강수 추정을 의미하며, TRMM 관측시기에 얻은 의미있는 지식과 경험들을 토대로 보다 정확한 전구강우관측을 목적으로 하고 있다. GPM 시기에는 9개의 합대위성들로부터 수집한 3시간 간격의 관측 결과를 이용한 5% 정도의 오차와 20% 정도의 불확실성을 갖는 마이크로파 기법에 기초한 강수 자료의 생산이 가능하게 된다. GPM을 위해 개발 중인 DPR과 보조 위성에 탑재될 9개의 수동 마이크로파 복사계는 위성 관측기와 지상 관측 기기 사이의 관계처럼 교차보정의 훌륭한 수단이 된다. 그러므로 GPM은 약한 비, 따뜻한 비, 눈, 그리고 다른 얼어있는 상태의 강수의 측정 알고리즘을 개선할 수 있을 것이다. DPR은 잠열 알고리즘과 매우 다양한 입자 크기 분포에 관련된 질량 스펙트럼 특성들을 개선함으로써 한 개의 주파수를 가진 TRMM PR 보다 더 정확하게 강수를 탐지하게 된다.

GPM은 강수 자료의 최종 사용자의 관점에서 TRMM 기간동안 축적한 경험을 바탕으로 높은 빈도의 전구영역 관측, 다양한 강수 물리 현상 분석 그리고 관측오차의 수량화 등을 현실화 할 수 있을 것이다. GPM 관측을 통한 이러한 새로운 결과들은 전 지구적인 물과 에너지 순환뿐만 아니라 물과 관련한 기후 시스템 변화와의 관련성을 규명할 수 있으며, 일기 예보, 홍수 예측, 상수원 관리, 농업 계획 수립, 인류의 건강 문제 등의 인류의 삶을 지탱해주는 중요한 분야들에서 새로운 자료의 공급하게 될 것이다.

3. GPM 관련 국내의 동향

TRMM의 성공을 발판삼아 중요한 기후 인자인 전 지구적인 강수 관측을 계획하고 있는 GPM은 강수 구조를 관측하는 핵심 위성과 보정 값을 제공받아 전 지구적인 강수 관측을 수행할 합대위성, 세계 각지의 다양한 강수 관측 기기를 갖춘 검보정 관측소들, 그리고 전구 강수 분포 지도를 제공하고 기후 연구 자료를 처리하는 시스템들로 구성되어 있다. NASA는 핵심 위성과 보조 위성의 발사, 마이크로파 복사계, 강수 자료 처리 시스템, 프로젝트 관리 시스템 그리고 지상 검보정 관측소를 제공할 계획이다. 일본의 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)는 핵심 위성의 레이더와 발사로켓을 제공할 예정이다. 유럽의 European Space Agency (ESA)는 GPM의 일원으로 마이크로 복사계와 레이더를 탑재한 위성 프로그램을 수행하는 European GPM (EGPM) 계획하고 있다. 그리고 인도와 프랑스는 저위도 관측을 주목적으로 하는 Megha-Tropiques 프로젝트를 통해서 GPM에 기여하고자 한다. 이외 여러 나라는 지상검보정 프로그램에 참여하여 간접으로 GPM에 기여하기를 희망하고 있다.

국내에서는 대학과 기상청을 중심으로 가칭 한국 GPM (KGPM) 연구팀이 구성되어 2003년 GPM 사업 참여의 타당성에 대한 기상청 기획연구를 수행한바 있다 (기상청, 2004). 연구팀은 GPM 사업의 참여가 국가적인 차원에서 이루어져야 하며 특히 검보정과 활용 연구 분야에의 참여가 현실적임을 주장하고 있다. 한반도에서 강우관측과 관련하여 기상청은 공간 분해능 약 15 km에 해당하는 590여개의 AWS 관측소에서 바람, 온도, 이슬점 온도, 강수량 등을 1분 단위로 측정하고 있어 세계적으로 우수한 강우 관측망을 확보하고 있어 강우관측자료의 검보정 활용의 가능성이 매우 크

다. 검보정 자료로 활용할 수 있는 레이다 관측의 경우 8개의 현업용 레이다와 1개의 연구용 레이다가 한반도 전체와 가까운 해양의 관측을 수행하고 있고, 산악 지역을 담당할 두 개의 레이다가 신설될 예정이어서 관측보정이 수행되는 경우 그 활용가능성은 충분히 크다. 또한 경계층 레이다, 오토존데, 마이크로 강수 레이다와 같은 새로운 관측 장비를 갖고 있는 관측소도 검증을 위한 자료들을 제공할 수 있어 이의 활용이 가능하리라 생각된다.

아래의 Fig. 2는 국내 GPM 사업의 진행 방향과 활용 분야 등을 예상하여 나타낸 모식도이다. 조밀한 지상 관측망을 바탕으로 강수 자료의 검증을 실시할 예정이며, 품질이 검증된 강수 자료를 활용하여 자료 동화 기법을 개선하고, 일기 예보, 수자원 관리, 홍수 예보 및 악기상 감시, 구름 모델 개선, 기후 응용, 농업 분야에의 응용 등이 가능하리라 예상된다. 향후 GPM 결과물의 검증을 목적으로 한반도에서의 지상 관측 자료와 위성 자료를 축적한다. 층상, 대류, 전선, 중규모 대류 시스템과 같은 강수 구조는 마이크로파 강수 레이다, 광학 우량계, 위성 관측 자료를 이용하여 분류될 것이며, 지상 관측 값과 위성 관측 값은 시공간적으로 일치하는 자료를 구축하여 비교할 것이다. 얻어진 강수

정보는 지역과 전구 모델의 동화 자료로 사용될 것이며, 강수 자료의 유용성은 민감도 연구를 통해 평가될 것이다.

4. GPM 활용 극대화를 위한 핵심 기술

GPM 자료활용의 극대화를 도모하기 위한 필요 핵심 기술로서는 강수 강도 산출 기술, 자료 동화 기술, 검보정 기술 등을 들 수 있으며 활용 기술로는 대기물 현상, 기후 응용, 수문/수자원, 농업 분야 그리고 집중호우/태풍 감시 등을 들 수 있다.

4.1 강수 강도 산출

우리나라에서 가장 심각한 재해를 유발하는 기상 현상 중의 하나로 짧은 시간 내에 급격히 발달하여 국지적인 집중호우를 유발하는 중규모 현상을 들고 있다. 이의 정확하고 신속한 예보의 필요성에도 불구하고 현재의 관측체계에 의존하고 있는 예보시스템에서는 예측의 어려움은 물론 이의 발생시 신속한 대응에 한계가 있음이 지적되고 있다(기상연구소, 1998).

단시간에 발생하여 상황이 종료되는 집중호우를 보

Schematic Diagram of Korea GPM (KGPM)

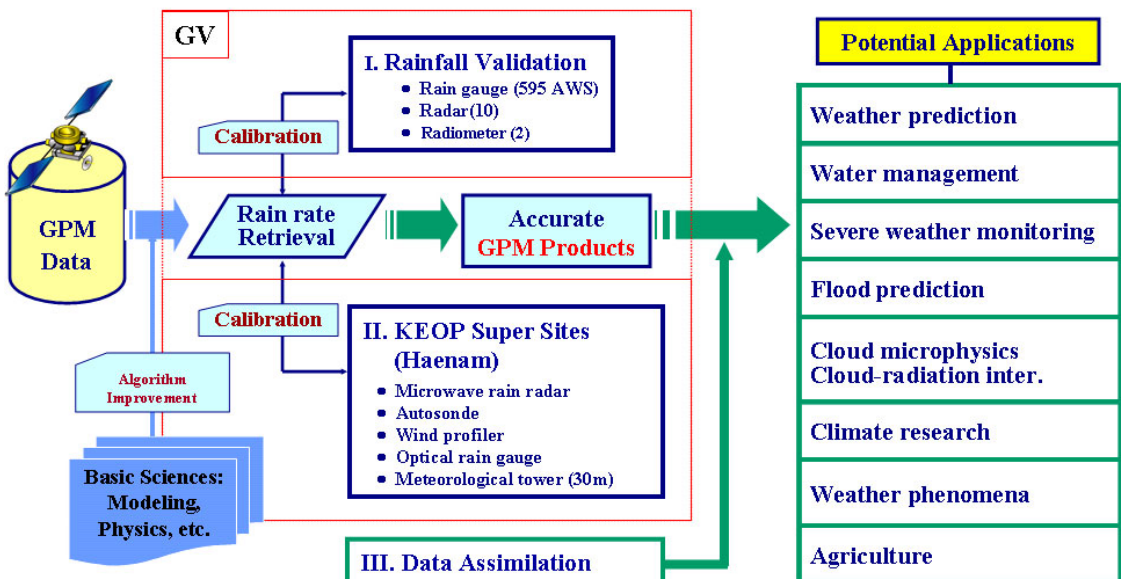


Fig. 2. Schematic diagram of the Korea GPM.

다 정확히 예보하기 위한 노력으로 순간예보 기법이 사용되고 있으며 인공위성 자료는 이러한 목적으로 자주 이용되고 있다. 인공위성 자료는 광범위한 영역에서 가시 및 적외 영역 자료를 높은 시·공간적 분해능으로 제공하고 있어, 종관 규모운동 뿐 아니라 소규모 대류 운동도 탐지가 가능하다. 그러나, 인공위성으로부터 얻은 강수정보는 위성에서 측정한 복사량을 강수량으로 변환해야 함을 전제로 하고 있어, 운정의 정보를 주로 반영하는 가시 및 적외선 자료를 이용하는 방법은 강수량과의 그물리적 상관관계가 낮다. 반면 구름 내부구조에 의해 크게 영향 받는 마이크로파를 이용하는 기법은 보다 직접적이고, 물리적이라 할 수 있지만 소규모 대류운동에 적용하기에는 시·공간적인 분해능이 낮다는 단점이 있다.

따라서 높은 시·공간적인 분해능이 요구되는 순간예보를 위해서 정지 위성의 적외 자료로부터 마이크로파 관측으로 얻을 수 있는 수준의 정확도를 갖춘 강수량을 산출하는 방법을 모색할 수 있다. 특히 우리나라는 지형이 복잡한 산악구조를 가지고 있어 이의 영향을 포함하고 있는 한반도 주변의 강수 시스템에 적합한 알고리즘 개발이 요구된다. 정지기상 관측자료와 GPM 자료와의 연계는 2008년 5개 채널의 기상센서가 우리의 정지 위성인 COMS에 탑재되어 활동하게 되므로 시간적 해상도를 확보한 IR/Vis의 강수강도의 정확도 향상을 위해 필수적이라 판단된다. 집중호우 감시 및 수치예보 정확도 향상을 위한 강수량 추정알고리즘 분야의 핵심기술을 도식화하여 Fig. 3에 제시하였다.

4.2 검보정 기술

원격탐사에 의해 생산된 정보의 활용에서 가장 중

요한 기술 중의 하나는 생산 자료의 검보정 기술이다. 검보정의 주안점은 강수산출 알고리즘의 개발을 위한 분야와 사용자의 활용성을 확보하기 위한 분야에 있다. GPM 강수자료의 사용 분야는 자료동화, 기후 진단, 그리고 강수구조 및 역학에 대한 기초연구 등이 있다. 활용 분야에 따라 필요로 하는 검정자료의 특성이 다양하며, 이에 따라 다양한 특성을 파악하기 위한 검보정 기술의 개발이 요구된다. 이를 위해 지상의 실시간 자료뿐 아니라, 특정기간 동안에 집중적으로 이루어지는 집중관측 자료의 생산도 요구된다.

GPM 자료의 정확도를 판단하기 위해서는 정량적인 위성 강수강도 평가기법 개발이 필요하다. 평가기법은 관측센서/알고리즘에 따른 검보정기법 개발, 지상 강수 관측자료의 품질 진단, 위성 강수 관측자료 시공간 오차분석 등을 통해 정량적으로 확보할 수 있다. 이를 위해 실시간/집중 지상 관측자료를 이용한 GPM 강수 관측 자료진단, 현업자료 생산 및 집중관측 프로그램 실시가 필요할 수 있다. 우리의 경우 기상청에서 운용하고 있는 AWS 강우관측치를 활용하는 강수강도 산출 알고리즘 검증의 노력이 필요하며, 이 과정에서 확보한 여러 지식과 기술은 지상관측기술 확보와 자료 품질관리 등의 실용화에 재투자되어야 한다.

Fig. 4에 GPM 관측자료와 지상자료를 연계한 검보정 기법에 관련한 핵심분야를 도식화하여 제시하였다.

4.3 자료 동화

과거 현업 수치모델의 구름 및 강수 예측을 위한 수분물리과정은 주로 수증기 변수가 고려되었다. 수증기 정보는 라디오존데 관측을 이용하여 제한적으로 수치예보 모델에 입력되었으며, 존데 관측이 부재한 지역

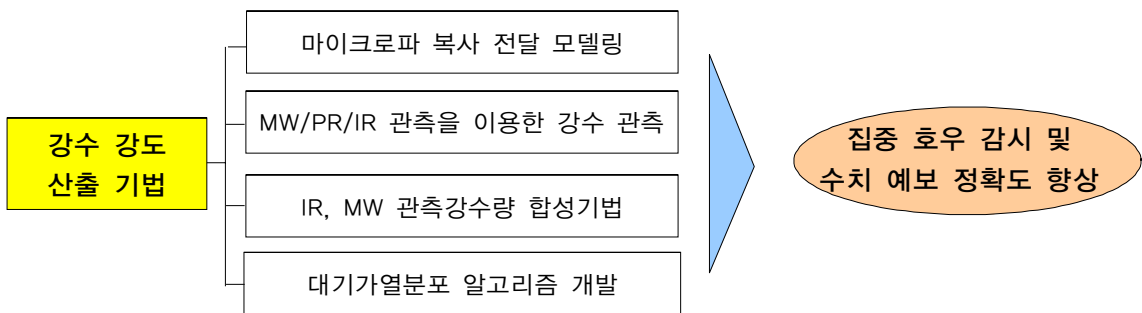


Fig. 3. Objectives and focal areas of rain rate estimation techniques.

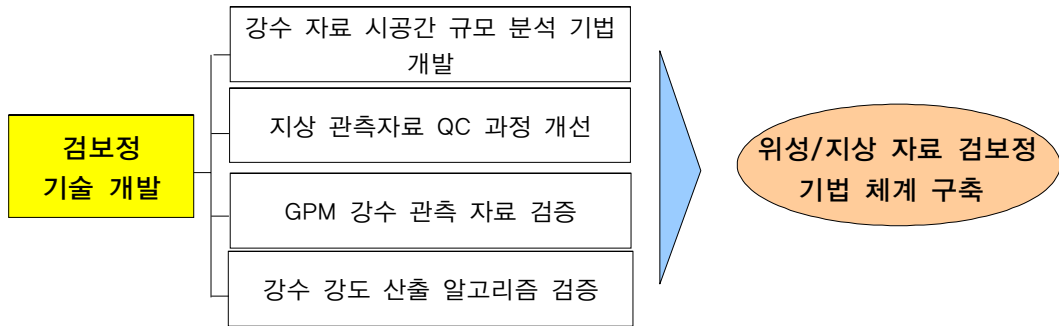


Fig. 4. Objectives and focal areas of CAL/VAL techniques.

에서는 위성관측 수증기자료가 이용되었다. 그러나 점차 많은 현업 예보 모델이 보다 복잡한 강수 물리과정을 적용하게 되고, 정지위성의 수증기 탐측기나 극궤도 위성으로부터 산출한 가강수량 등과 같은 새로운 종류의 수분장 관측 자료가 가용하게 되어 보다 정교한 수증기의 자료동화 과정이 발달하게 되었다. 이로부터 강수, 열대 저기압의 진로 등 여러 측면에서의 예측성 향상에 있어 긍정적인 결과를 가져왔다.

지금까지의 긍정적인 자료동화의 발전에도 불구하고 수분물리과정의 제어를 위한 수증기만의 자료동화는 제한적인 수밖에 없어 구름과 강수에 대한 보다 직접적인 정보를 동화할 수 있는 방법들이 고려되어야 한다. 위성의 마이크로파 관측을 이용한 직접동화 방법의 하나로서 1D-Var (1-Dimensional Variational Data Assimilation) 방법을 통하여 해상에서의 예측성 향상에 많은 진전이 있었지만 (e.g., Eyer *et al.*, 1993) 강수지역에서의 복사값의 직접적인 활용은 미세물리과정에서의 자유 파라미터가 너무 많다는 점을 고려할 때 거의 불가능한 것으로 평가된다. 따라서 강수구역에서의

강수강도를 독립적으로 산출하고 이를 다시 자료동화 과정에 적용하는 방식의 접근이 요구된다.

지금까지의 연구에서 강수량 자료동화는 방법적인 측면에서 크게 물리적초기화 방법(e.g., Krishnamurti *et al.* 2001; Jones and McPherson 1997)과 4D-Var 방법(e.g., Xiao *et al.* 2000; Zupanski and Mesinger 1995)으로 나누어 볼 수 있으며 전구 모델의 경우는 과다한 계산 시간 등의 요인으로 물리적 초기화 방법이 선호되는 경향이 있다. 지역 모델의 경우는 레이더와 지상 우량계의 합성을 통한 강수 추정 등이 자료동화에서 주요한 정보로 활용될 수 있으나 전구 모델의 경우는 전적으로 위성관측을 통한 추정 강수가 매우 중요한 역할을 하게 된다. 최근 여러 기관의 연구 결과에 의하면 SSM/I나 TRMM 위성을 통해 산출한 강수가 여러 자료동화 방법을 통해서 전 지구 분석과 예보를 효과적으로 향상시킬 수 있음이 밝혀졌다 (Hou *et al.* 2001; Bauer *et al.* 2002). 따라서 향후 매 3시간 간격으로 분석될 예정인 GPM 강수의 활용은 수치예보에 있어서 획기적인 정보가 될 것으로 생각하며 이를 적절히 활용

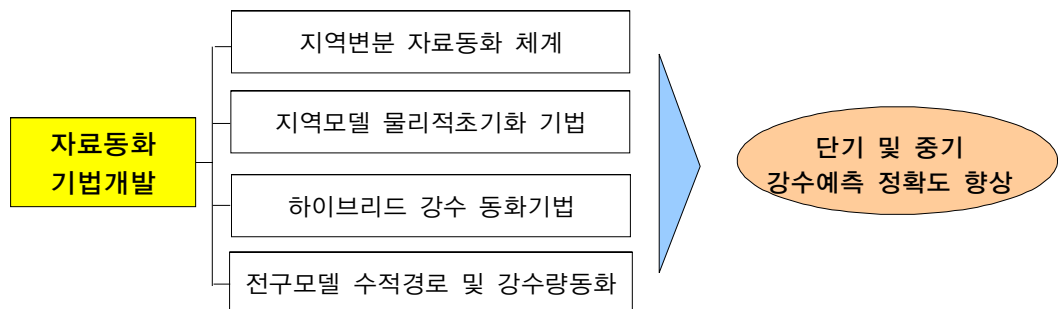


Fig. 5. Objectives and focal areas of rainfall data assimilation techniques.

하기 위한 자료동화 기술의 개발이 절실히 요구된다.

핵심기술로 강수량 동화를 위한 지역 변분 자료동화 체계 개발, 물리적 초기화 기반의 지역 강수 자료동화 기술 개발, 전구모델에서의 운량 및 강수량 동화기법 개발, 변분 자료동화 체계에서의 GPM 관측 강수적용 및 물리과정 향상, 3D-Var 기반의 하이브리드 강수동화기술 적용 및 개선, GPM 수적경로 및 강수량 물리적 초기화 기술 구현 등을 들 수 있다. 단기 및 중기 강수예측 정확도 향상에 기여할 수 있는 핵심기술을 요약하여 Fig. 5에 제시하였다.

5. GPM 자료 활용분야

5.1 대기물리과정 연구

대기순환과 연관되어 지구표면에 증발한 물은 응결 과정을 통하여 구름의 형태로 머무르면서 태양복사 및 지구복사에 영향을 준다. 변화된 복사장은 다시 대기순환에 영향을 준다. 이러한 구름-복사 피드백은 대기과학의 여러 분야 (예를 들면, 열역학, 역학, 구름 미세물리)의 연구에 중요한 부분을 차지하고 있다. 이 때문에 구름-복사 피드백의 중요성은 주로 강조되고 있는 기후연구에만 국한되지 않고, 대기현상의 이해와 규명에 도움을 주고 있다 (Arkin, 1991; Sohn and Smith, 1992; Lau *et al.*, 1998; Larson *et al.*, 1999; Lindzen *et al.*, 2001 등 많은 연구). 구름-복사 피드백은 관측측면에서 구름과 강수의 시공간의 정확한 관측이 요구되며, 모델연구 측면에서는 구름과 강수량의 정확한 모의가 중요한 부분을 차지하고 있다. 이는 구름-복사 피드백을 연구하기 위해서 대기물 현상을 조사하는 작업이 필수적임을 뜻한다.

한편 구름의 생성, 강수, 증발과 밀접한 관계를 가지고 있는 수증기 수송에 관한 연구는 수증기 수송이 곧 에너지의 수송임을 고려할 때 물순환 연구에서의 핵심이라 할 수 있다. 최근 Sohn *et al.* (2004)은 인공위성에서 관측한 강수량과 증발량을 조합함으로써 수증기 수송의 전구 분포 생산의 가능성을 보였다. 곧 정확한 강수량의 추정은 정확한 수증기 수송계산에서 전제되어야 하는 사항이며, 이는 동아시아 몬순 등의 수증기원을 밝힐 수 있는 단초를 제공하고 있다.

따라서 동아시아 몬순에 영향을 끼치는 해수면 온도-구름/복사량/강수량 변동 관련성, 구름-대기 순환 피드백, 동아시아 여름철 몬순의 수증기원 등은 GPM 자

료의 활용분야가 될 수 있으며 구름모델의 개발, 대기 모델 모의에서 미세물리과정의 검증 등에 이용될 수 있다.

5.2 몬순연구

한반도가 위치하고 있는 동아시아는 여름/겨울동안 몬순의 영향을 받고 강한 제트류가 상존하여 전 세계적으로도 일기변화 (혹은 기후변동)가 가장 심한 지역으로 알려져 있다. 이처럼 변화의 폭이 큰 대기 순환은 물 순환의 큰 변동과 직접적으로 맞물려 있다. 동아시아 몬순의 변화는 바로 우리나라 여름철 기후를 결정하는 장마의 변화이다. 장마는 시간적으로 공간적으로 다양한 형태를 지니고 있고, 또 많은 요인들에 의하여 영향을 받고 있기 때문에 현재 기후모델에서도 잘 모의가 되지 않고 있다. 따라서 신뢰성 있는 장마 예측은 바라기 힘든 실정이다. 이와 관련되어 기후모델링 분야의 난제중의 하나는 동아시아 몬순을 정확하게 모의하는데 있을 것이다.

기후모델에서 동아시아 몬순 모의의 어려움은 이 지역에서 매우 큰 강수 변동성이 큰 것이 원인이기도 하지만, 강수량 관측 부족에도 그 원인이 있다. 특히 연직분포에 대한 우리의 지식은 미천하다. TRMM 관측을 통하여 그 실체가 어느 정도 파악되었지만, 38°N 이남에 국한된 관측으로 일반적으로 이보다 북쪽에 위치한 제트류와 우리나라 장마와의 관련성 분석 연구에는 다소 미흡하다. 또한, TRMM에 탑재된 PR 측기는 한 개 채널을 사용하여 관측해왔으나 GPM은 두 채널의 레이다를 탑재하여 관측 영역을 60°N 까지 확장하여 중위도 기압계에 따른 강수기구를 이해하는데 많은 도움을 줄 것으로 여겨진다.

기후모델에 포함되어 있는 물 순환 과정의 불확실성은 기후예측뿐 아니라 장기예측에도 큰 영향을 끼치고 있다. 일반적으로 장기예측의 정확성은 모델수행의 초기조건보다 해수면 온도나 지표면 온도 등의 경계조건이나 모델 물리과정에 주로 영향을 받는다. 따라서 불확실한 물 순환 과정이 포함된 대기대순환모델을 이용한 장기예측은 낮은 예측성을 가질 수밖에 없다. GPM의 정확한 물 순환의 관측을 바탕으로 물 순환-대기 순환의 관련성을 연구가 가능하며, 이의 기후모델의 검증과 개선에 활용이 가능하다. 이를 기반으로 하여 장기예측 (특히 동아시아 여름철 장마의 이해와 예측)에 획기적인 개선이 이루어질 것으로 기대한다.

5.3 수문/수자원 관련 연구

현재 계획하고 있는 GPM 사업의 궁극적인 목표가 3시간 간격의 강수량 자료의 생산에 있으므로 지구표면 및 내외부에 존재하는 물의 생성, 거동, 분포 및 부존 등에 관한 문제를 정성적 또는 정량적으로 규명하는 지역적 특성이 강한 자연과학의 한 분야로 정의되는 수문학에서 GPM의 활용성은 다른 어느 분야보다 크다고 할 수 있다. 수문학에서 강수량은 강수현상 자체의 규명도 주요 관심사이지만, 강수의 시공간적인 변화에 따른 호우관리, 유역관리 등 이수, 치수 및 하천환경 대책 수립도 공학적 접근에서 중요한 몫이다.

수문학에서의 강수량은 지점강수뿐 아니라 유역평균 강수가 중요한 의미를 갖는다. 통상 활용 가능한 강수 자료로는 AWS 지점강수에 의한 유역 평균 강수량의 산정 이외에 원격탐사(레이더, 위성)에 의한 강수량 산정이 가능하다. 이들 두 방법에는 각각의 장단점이 있는 것으로 알려져 있다. 지점강수의 경우 특정 지점에 대한 강수의 정확도는 우수하나 강수의 공간분포에는 부정확성을 내포하고 있고, 이와 반대로 원격탐사에 의한 방법은 특정 지점의 강수량의 정확도는 다소 부족하나 강수의 공간분포를 잘 표현하므로 이들 두 기법의 장점을 혼용한 방법이 최적인 것으로 알려져 있다. 그러나 국내의 경우, 지점강수의 해석 및 이의 수자원 활용에는 많은 향상을 이루어 왔으나, 위성 강수의 수문/수자원 활용은 거의 전무한 실정이다.

인공위성 자료는 광범위한 영역에 대한 가시영역 및 적외자료를 높은 시공간적 분해능으로 제공한다. 인공위성 자료를 이용한 강수량 산정방법에는 IR 센서를 이용한 적외선 방법과 마이크로파를 이용한 방법이 있다. 그러나 인공위성으로부터 얻은 강수를 이용하는 것은 위성에서 측정된 복사량을 강수량으로 변환해야 함을 전제로 하고 있어 많은 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 인공위성에 의한 강수량 측정은 우량계나 레이더 설치가 용이하지 않거나 또한 설치가 되지 않는 지역(예, 북한지역)과 해양의 강수량 측정에 활용성이 매우 크므로 이에 대한 적극적인 연구가 요망된다. 즉 유역 규모 강수량의 시공간적 특성 해석을 통한 홍수, 가뭄 예측 등 GPM의 활용이 기대된다.

5.4 농업에의 활용

강수는 농작물의 정상적인 생육을 위한 토양수분의

공급, 차기 관개시기 및 관개량의 계획, 일정수준의 농작물 품질 및 수확량 확보, 농업용 저수지의 체계적인 물 관리 등과 직결된다. 지금까지 농업을 위한 강수정보는 지상의 기상관측소 자료에 의존하여 왔다. 그러나 이러한 전통적인 방법에 의한 강수모니터링은 우리나라와 같이 복잡한 지형조건, 특히 산간지역의 국지강수 등에 대한 강수발생지역의 정확한 구분은 어려운 일이다. 따라서 논은 하천주변을 따라, 밭과 과수원은 산언저리에 골고루 넓게 분포되어 있는 농경지에 대한 강수의 파악은 공간적으로 이루어져야 정보로서의 가치가 높아질 것이다.

한편 위성 강수자료는 광범위한 지역을 대상으로 공간적으로 분포하는 격자정보를 가지고 있으므로, 이와 같은 자료를 농업분야에서 효과적으로 활용하기 위해서는 GIS (Geographic Information System)와의 결합이 필수적이다. 위성강수자료와 농업관련 GIS자료 간의 결합 시에 고려하여야 할 기본적인 사항으로는 규모와 해상도 문제를 들 수 있다. 모델링 연구에서 특히 광역의 공간적·시간적 규모로 그 과정을 수행할 때, "어떠한 규모와 해상도로 어떻게 접근해야 하는가?" 하는 문제는 대단히 중요한 사항이다. 왜냐하면 서로 다른 해상도를 이용하면 그 분석결과가 상이하게 나타나게 되는데, 이는 공간분석의 근본적인 속성으로 알려져 있다. 일반적으로 기상위성자료는 수백 m - 수십 km 격자단위이지만, 농업분야에서는 그 적용규모(구역, 지역, 광역)에 따라 수십 m - 1 km의 격자가 사용된다. 따라서 적용규모에 따라 기상위성자료의 다운스케일링 기법의 개발이 요구된다.

농업분야에서는 위성강수자료가 토양수분 추적에 기본적으로 활용될 수 있는데, 토양수분 해석은 기존의 총괄형 모델보다는 분포형 모델로 접근하는 것이 바람직하다. 강수에 의한 분포형 토양수분 추적모델의 수행결과인 유역전반에 걸친 증발산량, 지표면 유출, 토양수분의 상황을 시간적·공간적으로 파악하게 됨으로써, 농작물 관리효율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 논은 강수에 의한 저류량의 공간적인 분포 파악이 가능하게 되어, 논의 저류능이 하천 유출에 미치는 영향을 파악할 수 있을 것으로 판단된다. GPM 자료가 이들의 필요를 전적으로 만족시키는 것은 아니지만 GPM 자료의 존재는 신뢰할 만한 자료의 생산에 크게 기여할 것으로 예상된다.

5.5 집중호우/태풍 감시

최근 들어 집중호우의 발생빈도가 높아지고 있으며, 집중 호우에 의해 많은 인명과 재산 피해가 발생하고 있다. 그러나 집중호우 피해는 강수 자체에 의한 것이라기보다는 호우로 유발되는 홍수 피해이다. 특히 우리나라의 경우 연 강수량의 2/3 정도가 여름철에 집중하는 기상 특성과 하천의 유로가 짧고 경사가 급한 지형적 특성 때문에 홍수로 인한 인명과 재산 피해가 많은 지역에 속한다. (기상연구소, 2000)

이러한 재해를 극복하기 위한 노력의 일환으로 기상청에서는 1988년부터 전국에 자동기상 관측망을 구축하여, 현재 590여개 이상의 AWS 관측소가 설치되어 관측소간 평균 거리가 15km 내외로 집중호우 관측망으로 충분한 공간 해상도를 제공하고 있다. 이를 기반으로 한 기상 위성 자료의 활용은 집중호우, 태풍 등의 악기상 감시망 체제를 확고히 하였다. 관측 자료의 품질이 악기상 감시를 위한 중규모 모델의 정확성을 향상시키는 것은 자명한 사실이다.

그러나, 현재의 기술력으로 단시간에 돌발적으로 발생하는 집중호우 예측이나 급변하는 태풍 경로를 정확히 예측함에는 한계가 있다. 이러한 한계 극복의 과제를 안고 있는 기상 예보 기술 분야에 3시간 간격의 양질의 전구 강수 자료를 제공하는 GPM 사업은 하나의 전환점을 가져다 줄 수 있다. 즉, 악기상 예측을 위한 중규모 모델의 입력 자료로서 모델 수행 능력을 향상시킬 뿐만 아니라, 지상 관측망의 자료와 GPM 강수 자료의 종합적인 분석을 통해서 보다 효율적인 집중호우/태풍 등의 악기상 감시 기법을 개발할 수 있다.

6. 기대효과 및 요약

최근 빈번해진 국내외의 대형 기상재해는 보다 정확한 기상 예보와 기후 변동 감시의 필요성을 절실히 느끼게 한다. 이러한 필요성을 충족하기 위해서는 자주 그리고 정확하게 전구의 기상상태를 관측할 수 있는 위성관측이 요구된다. 특히 집중호우, 태풍, 홍수, 가뭄 등의 악기상과 관련된 기후 시스템에서의 물 순환 변화는 인간 생활에 직접적으로 영향을 주므로, 강수 관측 및 과정에 대한 정확한 정보를 얻는 것은 매우 중요한 일이다. 이러한 필요에 부응하여 미국 NASA를 주축으로 일본, 유럽 등 기상 기술 선진국들이 공동으로 추진하고 있는 GPM 사업은 기상학적 당면 과제를

해결할 수 있는 실마리를 제공할 수 있으리라 판단된다. 전구에 걸쳐 3시간 간격으로 관측된 마이크로파 위성 강수 자료는 매우 효과적으로 기상예측에 사용될 수 있기 때문에 태풍, 집중호우, 홍수 등의 악기상 현상 감시 및 예보와 기상재해의 경감에 공헌할 뿐 아니라 한반도 기상/기후 변화와 연관된 수자원을 포함한 대기감시에 유용하게 사용될 수 있다.

우리나라가 GPM에 참여함으로써 얻을 수 있는 성과는 국내외적인 측면으로 상당할 것으로 판단하며, GPM 자료의 활용을 극대화하기 위한 체계적이고 효율적인 자원의 분배 및 추진 전략이 필요하다. 그 성과를 극대화하기 위해서는 긴 안목을 갖는 계획안을 도출하여 연구와 기술개발을 구조적이고 유기적으로 접근하는 방법의 고안이 필요하다 생각한다. 그 한 가지 방법으로 준비 및 기술 개발단계, 적용 및 검증단계, 기술 실용화 단계의 3단계로 구분할 수 있으며 기술분야에서 강수 강도 산출 기술, 검보정 기술, 자료동화 기술, 활용기술 등을 들 수 있다. 활용기술 분야는 다시 대기물 현상, 기후 응용, 수문/수자원, 농업, 집중호우/태풍 감시 등으로 세분화할 수 있다.

GPM 자료 활용의 극대화는 대기 원격탐사분야 발전에 국한된 것이 아니라, 실질적인 대기과학 분야의 외연확대는 물론, 기상예측능력의 향상을 도모하여 기상재해로부터 국민의 생명과 재산을 보호하는 국가이익의 극대화로 이어질 수 있을 것이다.

뿐만 아니라 이 논문에서 언급한 핵심기술 및 기대 효과들은 향후 대기과학 분야의 연구분야 발전에 지대한 영향을 미치리라 생각한다. 이러한 판단의 정당성은 미국의 대기과학 기후위원회가 총 11개 항목에 걸쳐 제시한 “21세기를 대비한 대기과학 분야 핵심 연구 개발 과제”의 많은 항목들이 GPM 사업 연구 과제와 일치하거나 관련이 있음을 통해 간접적으로 확인할 수 있다. 특히 수문순환에 대한 연구 증진과 보다 나은 대기물 관측은 GPM 사업 목적 그 자체라 해도 과언은 아니다. 이 외에도 자료동화 기법의 발전, 집중호우 관련 연구, 기후 변동성 연구 등이 GPM 자료를 활용한 기술 개발과 일치한다. 이와 같이, GPM 과제를 통해서 얻을 수 있는 기상기술들은 전 세계적으로 중요성이 인정되며, 관심이 집중되는 분야임을 알 수 있다. 우리 자신의 노력으로 국제 GPM 팀의 일원이 되어 우리나라의 기상 발전을 위해 그리고 기상 선진국으로 발돋움하기 위한 노력에 경주할 수 있는 기회가 주어질 것 희망한다.

7. GPM 활용의 극대화를 위한 제언

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있고, 연강수량도 전 세계의 평균값인 1000 mm보다 40 % 정도 많은 1400 mm에 이르기 때문에 예로부터 풍부한 물의 자원을 이용하여 왔다. 그러나 급속한 인구의 증가와 산업의 발달로 인하여 최근에 이르러서는 물 부족 국가로 분류되어있다. 특히, 우리나라가 위치한 동아시아는 거대한 대륙과 해양이 맞닿는 지역적 특성으로 인하여 기후적으로 세계에서 가장 변화가 심한 지역이다. 이의 변화는 또한 지구 온난화 및 기후변화와 맞물려 더욱 빈번해지고 있으며, 그 세기도 강해져서 극심한 이상기상으로 발전하고 있다. 이로 인한 인명피해 및 재산상의 피해는 해가 갈수록 증가하여 국가 경쟁력에 까지 영향을 끼치고 있다. 또, 빈번한 이상기상과 기후변화의 발생은 수자원의 원천이 되는 수문학적 순환의 변화에도 지대한 영향을 미치고 있다.

이와 같은 이유로 인하여 우리나라의 수문학적 순환의 이해와 이를 통한 단기/장기 예측성의 향상을 위하여 관측소의 증설뿐 아니라 시공간적으로 균일하고 광범한 지역을 관측할 수 있는 인공위성의 관측과 활용이 시급히 요구된다. 특히 강수량의 관측과 이의 기상예보에의 활용은 대기과학의 첨단 연구분야 중의 하나이며, 기상자원 활용을 극대화시키기 위하여 시급히 극복해야 할 과제이다.

현재 미국 NASA에서는 TRMM 위성의 성공과 업적에 기초하여 전구영역에서 3시간 간격의 강수량측을 겨냥한 GPM 위성의 발사를 계획하고 있다. GPM의 활용은 광범위한 관측영역과 거의 연속적인 관측횟수의 위성관측의 장점으로 보아 태풍, 집중호우, 홍수 등의 악기상 현상 감시 및 예보와 기상재해의 경감에 공헌은 물론 한반도 기상/기후 변화와 연관된 수자원을 포함한 대기감시에 유용하게 사용될 것이다. 이러한 GPM의 활용을 바탕으로 물 순환 메커니즘의 이해를 증진시킬 수 있으며, 단기 또는 장기 예측 정확도를 상당히 향상시킬 수 있을 것으로 예상하고 있다. 나아가 GPM은 수자원 관리 기술과 농경을 포함한 수자원 확보와 경영에 기여함으로써 국가 경쟁력과 향상에 기여할 것이다.

매년 기상/기후변동에 의하여 커다란 경제적/사회적 피해를 입고 있는 우리로서는 GPM 강수량 관측이 포함하고 있는 막대한 이익을 간과하지 않고 보상을 극대화하기 위한 방안으로 다음을 제안한다.

1. 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서는 위성체 및 센서를 제공하거나 관측사이트를 제공함으로써 상세 강수량 관측으로부터 얻을 수 있는 이익을 극대화하기 위한 노력을 계속하고 있다. 우리의 경제적 여건과 투자가 이에 준하지 못할지라도 세계 유수의 강수량 관측망을 바탕으로 GPM 사업에 동반자로서 참여해야한다. 현재 기상청에서 운용하고 있는 AWS 관측망이 GPM 관측 자료 검정 및 보정을 위한 사이트로 선정되어 GPM 사업의 일원이 될 수 있도록 노력해야한다.
2. GPM 사업에서는 서로 다른 연구 영역을 갖고 있는 많은 대기과학자들이 GPM 강수량을 이용한 대기현상의 이해, 나아가 기상/기후예측의 예측성 향상을 위하여 노력하고 있다. 우리도 GPM 자료 활용의 극대화를 위해 기상청의 수치예보과, 기상연구소의 예보연구실, 원격탐사연구실 등 자료의 생산, 단기/장기 기상예측에 관계되어 있는 부서의 관련자들이 연계하여 GPM 연구개발 및 활용에 참여해야 한다고 생각한다. 뿐만 아니라 학계 전문가들의 활발한 참여가 요구된다. GPM 연구에 학계가 참여함으로써 기초연구에의 투자는 물론 학문 후속세대의 양성을 도모할 수 있다.
3. GPM 연구의 적극적인 참여는 2008년 발사 예정인 정지기상위성 COMS 위성활용에 매우 긍정적인 영향을 미치리라 생각한다. COMS을 고려한 GPM 연구의 활성화가 필요하다. 즉, GPM의 참여는 COMS 프로그램의 국제적 위상 제고에 기여할 것이다.
4. 우리는 어떠한 경로를 택하든지 GPM 강수량 관측을 통한 집중호우/태풍 등에 관심을 갖게 될 것이며 이를 활용한 악기상 감시체계를 확립할 것이다. 따라서 이의 활용 분야인 수문/수자원 관리, 효율적인 댐 관리, 나아가 농업 생산성 향상 분야를 아우를 수 있도록 이들 분야의 전문가와 긴밀한 협조 체계를 유지해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업의 일환으로 수행되었다. 또한 COMS 기상자료처리 시스템 과제의 일부지원에 대해 감사한다.

참고문헌

- 과학기술부, 2000: 악기상 감시 · 예측 및 재해대응 기술 개발. 248pp.
- 기상연구소, 1998: '97 특정 연구 개발 사업 기상기술개발 연차 보고서. 389pp.
- 기상청, 2004: 전구강수량측(GPM) 결과 활용의 극대화 기획 연구. 148pp.
- 소방방재청, 2004: 최근 10년간 수계별-시설별 자연재해 총괄. 2004. 5. 14. 작성: <http://www.nema.go.kr/index.html>.
- Adams, W. J., P. Hwang, D. Everett, G. M. Flaming, S. Bidwell, E. Stocker, J. Durning, C. Woodall, T. Rykowski, E. A. Smith, 2002: Global Precipitation Measurement-Report 8 White Paper. July 2002: <http://gpm.gsfc.nasa.gov/library.html>.
- Bauer, P., J.-F. Mahfouf, V. Marecal, F. Chevallier, P. Lopez, and E. Moreau, 2002: Status of rainfall data assimilation of ECMWF. The First Workshop of the International Precipitation Working Group. 23-27 September 2003, Madrid, Spain.
- Hou, A. Y., S. Zhang, A. da Silva, W. S. Olson, C. D. Kummerow, and J. Simpson, 2001: Improving global analysis and short-range forecast using rainfall and moisture observations derived from TRMM and SSM/I passive microwave sensors. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **81**, 659-679.
- Krishnamurti, T. N., S. Surendran, D. W. Shin, R. J. Correa-Torres, T. S. V. Vijaya Kumar, E. Williford, C. D. Kummerow, R. F. Alder, and J. Simpson, 2001: Real-time multianalysis-multimodel superensemble forecasts of precipitation using TMI and SSM/I products. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 2861-2883.
- Jones, C. D., and B. Macpherson, 1997: A latent heat nudging scheme for the assimilation of precipitation into an operational mesoscale model. *Meteor. Appl.*, **4**, 269-277.
- Li, Qihang, Bras, Rafael L., Veneziano, Daniele. 1996: Analysis of Darwin Rainfall Data: Implications on Sampling Strategy. *J. Appl. Meteorol.*, **35**, 372-385.
- Lindzen, R. S., M.-D. Chou, A. Y. Hou, 2001: Does the Earth have an adaptive infrared iris?. *Bulletin Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 417 - 432.
- Morrissey, Mark L., Janowiak, John E. 1996: Sampling-Induced Conditional Biases in Satellite Climate-Scale Rainfall Estimates. *J. Appl. Meteorol.*, **35**, 541 - 548.
- Smith E. A. and co-authors, 2004: International global precipitation measurement (GPM) program and mission: An overview. June 2004: <http://gpm-science.gsfc.nasa.gov>.
- Sohn, B. J., and E. A. Smith, 1992: The significance of cloud-radiative forcing to the general circulation on climate time scales - A satellite interpretation. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 845-860.
- Soman, Vishwas V., Valdés, Juan B., North, Gerald R. 1995: Satellite Sampling and the Diurnal Cycle Statistics of Darwin Rainfall Data. *J. Appl. Meteorol.*, **34**, 2481-2490.
- Xiao, Q., X. Zou, and Y.-H. Kuo, 2000: Incorporating the SSM/I-derived precipitable water and rainfall rate into a numerical model: A case study for the ERICA IOP-4 Cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 87-108.
- Zupanski, D., and F. Mesinger, 1995: Four-dimensional variational assimilation of precipitation data. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1112-1127.